第38卷 第6期
2021年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 6
Nov. 2021

近53 a新疆水分盈亏量时空变化特征

卢宝宝[1]， 孙慧兰[1]， 姜泉泉[2]， 曹丽君[1]， 兰小丽[1]， 张乐乐[1]， 刘天弋[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 国家能源集团新疆吉林台水电开发有限公司，新疆 伊犁 835700）

摘　要：采用新疆58个气象站1965—2017年逐日气象资料，通过Penman-Monteith (P-M)模型计算潜在蒸散，并结合降水量求得水分盈亏量；应用Mann-Kendall (M-K)突变检验、小波分析和Pearson相关分析方法，分析了新疆水分盈亏量时空变化特征及其影响因素。结果表明：(1) 近53 a来新疆地区水分盈亏量年际变化总体呈增加趋势，天山以南水分盈亏量增加速率最大，其次是天山以北，天山区最小，全疆平均增加速率为72.28 mm·(10a)$^{-1}$；季节上水分盈亏量的变化：夏季＞春季＞秋季＞冬季，夏季线性变化速率最大，冬季最小。(2) 空间上各季节水分亏损最大值主要出现在吐鲁番盆地及周边、哈密地区以及巴音郭楞蒙古自治州北部地区，最小值主要位于伊犁河谷及阿勒泰地区。变化趋势上大部分地区年水分盈亏量都处于增加趋势，减小趋势主要位于天山以北及塔里木盆地部分地区。(3) 新疆平均水分盈亏量时序数据1985年发生了一次突变，除天山以北地区外，其余地区2000年以来水分盈亏量下降趋势明显，并且以28 a的时间周期为第一主周期发生变化。

关键词：新疆；水分盈亏；Penman-Monteith模型；气候变化；时空特征

全球气候变暖导致区域降水量、蒸散量等气候要素正在发生显著变化[1]，并将改变区域干湿状况，诱发极端气象事件[2]。近年来我国西北干旱区气候变化明显[3-5]，西北干旱区气候是亚洲中部大尺度干旱气候区重要组成部分，目前虽然干湿气候区格局并未发生变化，但局部干旱区存在明显的气候波动[6]。自20世纪80年代中期以来西北干旱区气温和降水急剧升高，2000年以来上升趋势有所减缓[7]，其中气温的上升是中国平均升温速率的1.39倍[8]，近几十年西北干旱区相对湿度出现不显著下降趋势[9]。气候的干湿变化对西北干旱区脆弱的生态环境以及农业可持续发展影响重大，水分盈亏量作为表示地区气候干湿状况的重要气候指标[10]，其综合考虑了降水和蒸发的共同作用，能够较为真实地反映区域水量收支状况[11]，在我国多地区应用广泛。例如，颜雅琼等[12]对淮河流域、史建国[13]、徐冬平[14]等对黄河流域水分盈亏量进行研究；高歌等[15]通过研究中国十大流域水分盈亏量得出中国多年平均水分盈亏量（1961—2010年平均）为亏损状态，姚玉龙等[16]对甘肃省水分盈亏量探讨表明多年平均水分盈亏量亏损状态有显著的减小趋势，姚晓军等[17]指出中国西北地区水分盈亏量总体亏损状态呈增加趋势。

新疆作为我国西北干旱区主要组成部分，1965—2017年新疆气温以0.32 ℃·(10a)$^{-1}$、降水以8 mm·(10a)$^{-1}$的速率增加，这对区域水资源、农牧业等的平稳发展提出了新的要求[18]。新疆气候干湿变化在全球变暖背景下，过去53 a新疆绝大部分地区气温升高、降水增多，气候总体呈现不同程度的“暖湿化”趋势[19-23]，暖干–暖湿气候模式主要出现在天山地区西部和新疆北部[24]。此外新疆大部分地区农业生产严重依赖灌溉，水分亏损量的增减和波动对区域农业生产灌溉产生直接影响。近些年针对全疆和局部地区干湿变化研究侧重于气温、降水和蒸散发，但对水分盈亏量时空变化特征和规律以及不同区域差异的研究较少。基于此，本文根据前人

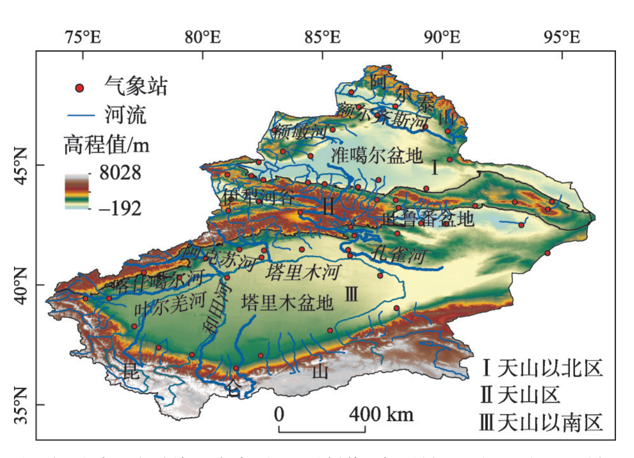
收稿日期：2020-12-12； **修订日期：**2021-02-16
基金项目：国家自然科学基金项目（41761004）；新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心招标课题（XJNURWJD012018B01）
作者简介：卢宝宝（1994-），男，硕士，主要从事自然资源开发与规划方面的研究. E-mail: 3199861965@qq.com
通讯作者：孙慧兰. E-mail: hlsunxjnu@sina.com

的研究成果以及新疆干湿地区划分和区域自然地理差异[25-26]，以新疆天山为地理界限，将全疆划分为天山以北，天山区和天山以南3个地区，分析新疆53 a来各地区水分盈亏量的时空变化特点、变化趋势以及驱动因子，从而进一步了解新疆气候干湿变化规律，以期从全疆和不同地区把握新疆水分盈亏量的时空差异性，为适应气候变化，因地制宜地采取综合节水措施，促进新疆生态建设与恢复提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

新疆位于亚欧大陆腹地，地理位置位于34°25′~48°10′N，73°40′~96°18′E，远离海洋，属干旱和半干旱地区（图1）。水汽的主要来源是纬向西风环流（地中海、里海、黑海、大西洋）和北冰洋的气流，冬、春季水汽来自地中海和里海，夏季来自北大西洋和北冰洋，秋季来自黑海和里海[27]。新疆地形复杂，总体呈“三山夹两盆”的地形特征，由于受天山阻隔，来自北冰洋的水汽难以到达南疆，西风环流也无法将水汽输送到吐鲁番、哈密以及南疆的广大地区，水分区域差异较大。



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号：GS(2019)3333号，底图无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 数据来源

气象数据采用中国气象科学数据中心（http://data.cma.cn/site/index.html）提供的1965—2017年新疆逐日气象数据，考虑到气象台站观测中缺测和误测等问题，从66个气象站点中筛选出58个气象站点数据（图1），分别选取这58个气象站点的平均气温、降水量、相对湿度、平均风速、日照时数等进行分析，计算出日水分盈亏量，然后进行月和年的统计。季节划分采用春季（3—5）、夏季（6—8）、秋季（9—11）、冬季（12月—次年2月）的气象季节划分标准。

1.3 研究方法

1.3.1 水分盈亏量 水分盈亏量是表征地表干湿程度的一个重要指标，综合考虑了降水和蒸发的共同作用，能够直观反映区域水量收支状况，计算气候水分盈亏量K时，用降水量P与潜在蒸散量ET_0的差值来表示[28]，具体公式如下：

$$K = P - ET_0 \tag{1}$$

式中：当K值为正时，表示水分盈余；K值为负时，表示水分亏缺；K值为零时，表示水分收支平衡。

潜在蒸散量（ET_0）的计算采用联合国粮农组织推荐的P-M模型。P-M模型作为一种综合了大气、土壤和植被因子的机理模型，经过不断地完善和改进，在国际上广泛应用于估算各种空间尺度的蒸散量，在干旱区干湿气候变化研究中应用比例更高，已充分应用于气候、水文等研究领域[29]。P-M模型的计算公式如下[30]：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T + 273.15}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{2}$$

式中：ET_0为潜在蒸散量（mm）；R_n为净辐射量（MJ·m^2·d^{-1}）；G为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；γ为干湿常数（kPa·℃$^{-1}$）；T为地表2 m高度处的平均气温（℃）；u_2为距地表2 m高度处的平均风速（m·s^{-1}）；e_s、e_a分别为饱和水汽压（kPa）和实际水汽压（kPa）；Δ为当前空气温度时的饱和水汽压曲线斜率（kPa·℃$^{-1}$）。

1.3.2 小波分析 水分盈亏量作为表示气候干湿变化的指标，有一定变化周期。小波分析相较于Fourier变换，在时间频率、多尺度进行细化，能够从信号的任意细节中分析时频变化。本文采用非正交的Morlet小波函数分析新疆近53 a水分盈亏量的周期变化规律[31]。

1.3.3 Mann-Kendall突变检验 M-K突变检验方法属非参数统计方法，计算简单且对异常值不敏感，对新疆各地区平均水分盈亏量进行突变检验，其计算方法原理是对时间序列T，构建一个序列S_k来计算第i个时刻数值大于第j个时刻时，数值个数的累

加值。在任意时间序列下的 UF_k 统计量计算公式如下:

$$UF_k = \frac{\left[S_k - E(S_k)\right]}{\sqrt{\mathrm{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{3}$$

式中:当 k 值为1时,$UF_k=0$,$E(S_k)$ 为 S_k 的平均值,$\mathrm{Var}(S_k)$ 为 S_k 方差。当计算 UB_k 时,需要将时间序列从后至前再重复公式(3)的计算过程,此时 $UB_k = -UF_k$ $(k = n, n-1, \cdots, 1)$[32]。

1.3.4 反距离加权插值法 IDW(Inverse Distance Weight)是一种常用空间插值方法,通过两点间距离倒数乘方来实现,即对两点的距离加权平均,通过已知点值计算出估计点的值。该方法依赖反距离的幂值,距离已知点越近,受影响越大,值也越相似,反之影响越小[33]。其权重系数计算公式如下:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^{n} d_i^{-p}} \quad \sum_{i=0}^{n} \lambda_i = 1 \tag{4}$$

式中:p 为指数值,取值为2,d_i 为待估点到第 i 点距离。

2 结果与分析

2.1 降水量和潜在蒸散量年际变化

水分盈亏量受同期降水量和潜在蒸散量影响,由图2可知,新疆各地区潜在蒸散量整体均呈上升趋势,但天山区和天山以南地区潜在蒸散量自1996年后出现波动下降趋势,其中天山以南地区变化最为明显,在1965—1996年增加倾向率为26.33 mm·(10a)$^{-1}$,1996—2017年下降倾向率为-24.57 mm·(10a)$^{-1}$。新疆各地区降水量呈缓慢上升趋势,天山区和天山以北地区降水年际波动变化较大。

2.2 水分盈亏量空间分布特征

全疆年和四季水分盈亏量空间分布特征鲜明(图3)。由于全疆各季节降水量始终小于潜在蒸散量,因此全疆四季水分都处于亏损状态,大体呈现从西到东水分亏损量逐渐增大。水分亏损最大值出现在哈密以及巴音郭楞蒙古自治州东部地区,夏季最高达500 mm以上;水分亏损最小值在春、夏两季,主要出现在伊犁州以及以南阿克苏地区;秋季主要集中在和田、莎车、阿克苏等地区,冬季水分亏损量最小值分布于伊犁州和阿勒泰地区;夏、秋两季水分亏损量天山以南整体小于天山以北。全疆年水分盈亏量变化幅度大,空间上最大值(哈密地区)与最小值(伊犁河谷、阿克苏)地区相差600 mm左右。

2.3 水分盈亏量年际变化

从图4可以看出,新疆各地区年际水分盈亏量总体呈增加趋势,水分亏损量减小。天山区、天山以北、天山以南和全疆历年平均水分盈亏量分别为-840 mm、-1430 mm、-1670 mm和-1330 mm,增加倾向率分别为34.36 mm·(10a)$^{-1}$、88.78 mm·(10a)$^{-1}$、93.69 mm·(10a)$^{-1}$、72.28 mm·(10a)$^{-1}$,1980—1990年水分亏损量减少最明显。1985—2017年水分盈亏量均值小于历年平均值,天山地区历年平均水分盈亏量明显大于天山以北和以南地区。

2.4 水分盈亏量年内变化

从图5可以看出,全疆秋季、冬季水分亏损量明显低于春季、夏季,全疆及各地区四季水分亏损量:

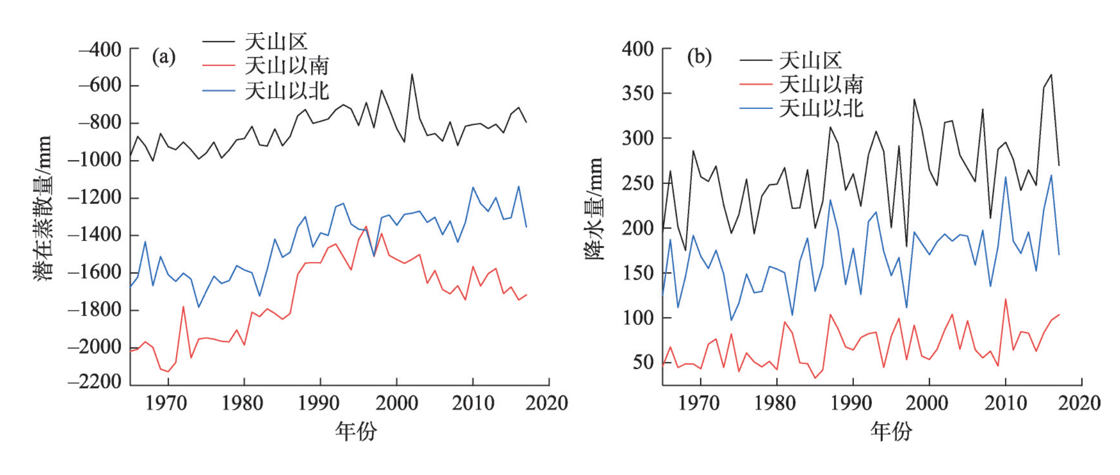


图2 降水量和潜在蒸散量年际变化

Fig. 2 Interannual variation of precipitation and potential evapotranspiration

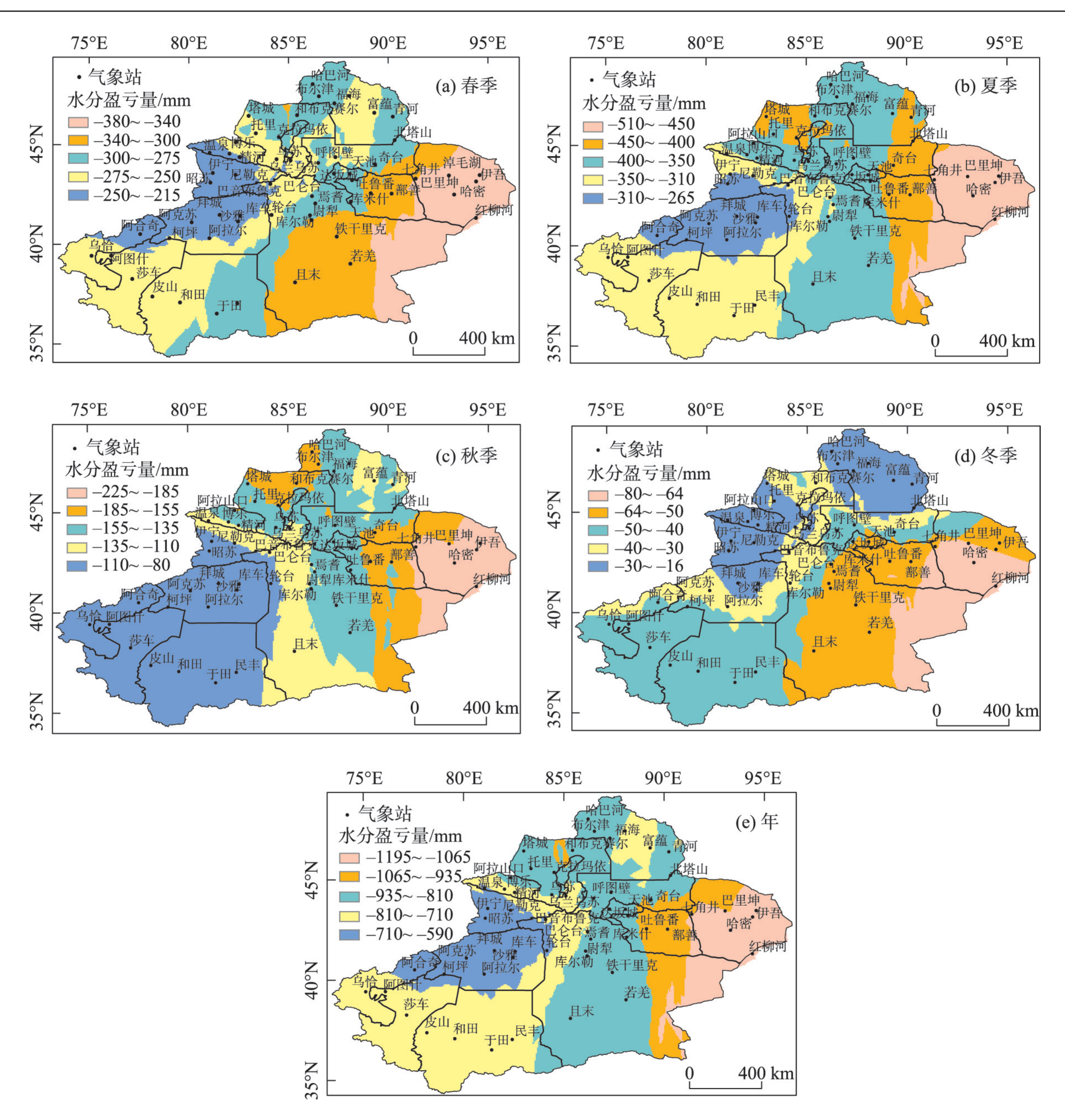


图3　1965—2017年新疆水分盈亏量空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of water budget in Xinjiang from 1965 to 2017

夏季＞春季＞秋季＞冬季。各地区夏季水分盈亏量波动最大，说明夏季气候不稳定，极端事件发生频率高，以天山区最明显。全疆四季水分盈亏量呈增加趋势，春、夏、秋、冬季水分盈亏量增加速率分别为11.59 mm·(10a)$^{-1}$、18.82 mm·(10a)$^{-1}$、9.99 mm·(10a)$^{-1}$、2.64 mm·(10a)$^{-1}$；从3个分区上看，天山以南和天山以北水分盈亏量夏季增加速率最为显著；各地区冬季多年平均水分盈亏量变化趋势不明显，天山区四季水分盈亏量变化速率相较于其他地区小（表1）。

2.5　水分盈亏量突变特征及变化周期分析

2.5.1　M-K检验和累积距平　采用M-K检验和累积距平曲线两种方法对新疆各地区平均水分盈亏量进行突变检验。由图6可以看出，天山区、天山以北和天山以南地区 *UF* 与 *UB* 曲线分别在1982年、1987年、1977年相交于两条临界线(±1.96)之间，对应的累积距平曲线在1986年存在明显的拐点，由持续下降转为持续上升趋势。通过M-K检验结果和累积距平曲线的走向可以说明，新疆平均水分盈亏量时序数据1985年发生了一次突变，此次突变具体表现

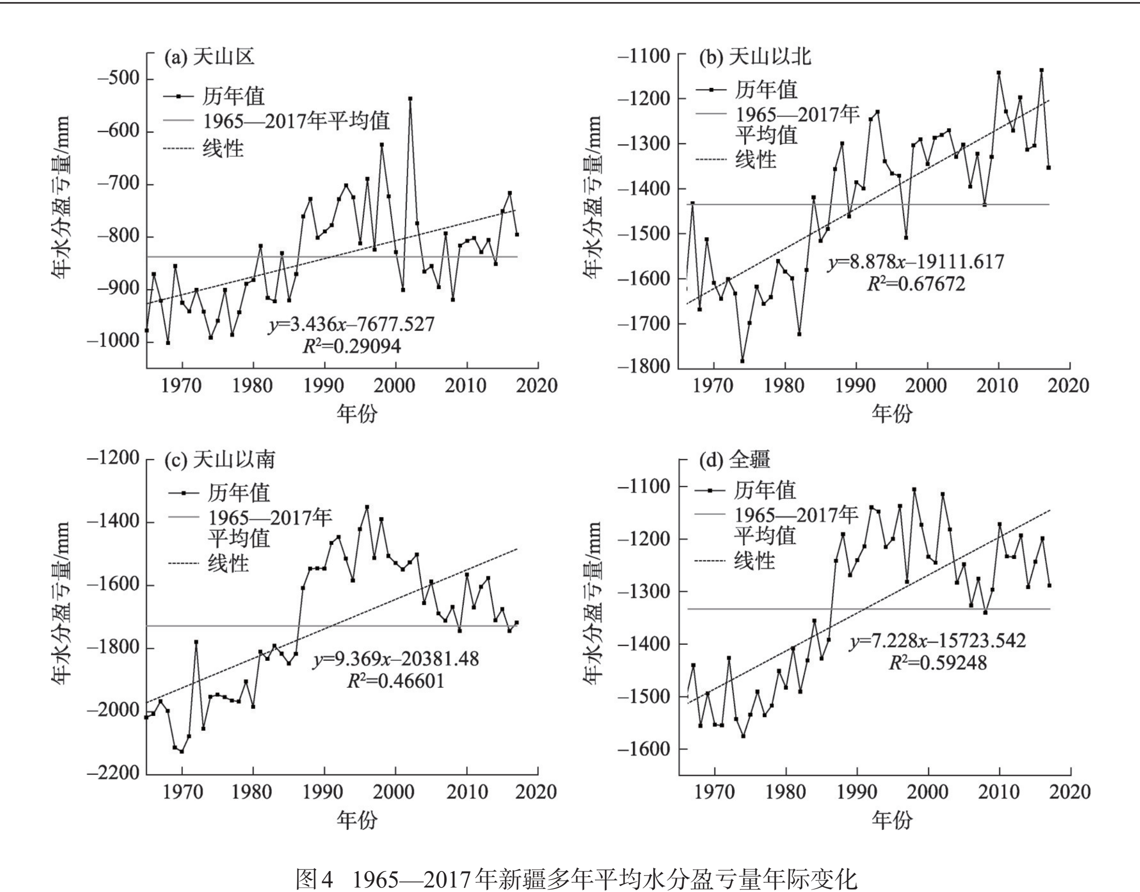


图4 1965—2017年新疆多年平均水分盈亏量年际变化

Fig. 4 Variation of average annual water budget in Xinjiang from 1965 to 2017

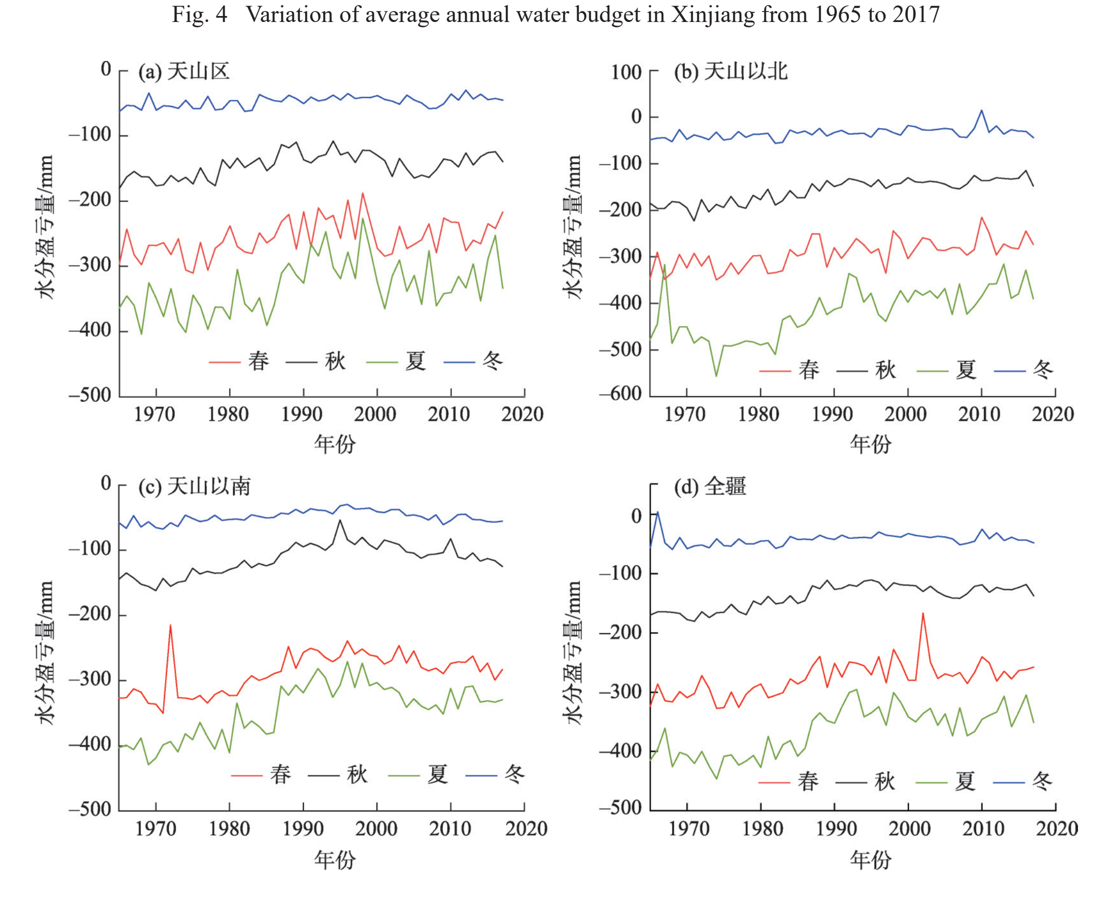


图5 1965—2017年新疆四季水分盈亏量的变化

Fig. 5 Temporal variation of average seasonal water budget in Xinjiang during 1965 to 2017

表1　1965—2017年新疆四季水分盈亏量变化趋势

Tab. 1　Trend of seasonal water budget in Xinjiang from 1965 to 2017　/[mm·(10a)$^{-1}$]

水分盈亏量	天山以北	天山区	天山以南	全疆
冬季	3.88*	2.61*	2.08	2.64*
春季	12.65*	10.19	11.93*	11.59*
夏季	24.58*	12.92*	18.95*	18.82*
秋季	13.97*	5.99*	10.01*	9.99*

注:*表示趋势显著,通过了0.05的信度检验。

为:全疆1965—1985年的年均水分亏损量为1487 mm,而1985—2017年的年均水分亏损量为1243 mm,相比水分亏损量减少244 mm。

2.5.2　水分盈亏量周期特征　利用Morlet小波函数分析1965—2017年全疆年均水分盈亏量周期变化特征。通过连续小波变换求得小波系数实部,绘制水分盈亏量时序数据在不同时间尺度上的小波系数等值线和小波方差曲线(图7)。小波系数实部等值线图中实线(正值)表示水分盈亏量偏高时期;虚线(负值)表示水分盈亏量偏低时期;加粗实线(零值)表示水分盈亏量发生急剧变化的时期。分析表明近53 a年来新疆年平均水分盈亏量存在明显的周期振荡特征,小波系数实部等值线在28 a左右时间周期振荡较为明显,表现为"负-正-负-正-负-正"交替的特征,且小波系数到2017年等值线尚未闭合,表明2017年之后一段时间内新疆年均水分盈亏量仍然处于偏低时期。通过小波方差进一步验证,年平均水分盈亏量在7 a和28 a处于波峰,12 a也出现波峰但不显著,表现出7 a和28 a的主要周期变化特征,并且在28 a时间周期上变化最明显,达最高小波方差,即为第一主周期,7 a为第二主周期。

2.5.3　水分盈亏量空间变化趋势　由于新疆地形起伏大,地域广阔,空间差异性突出,因此,有必要对全疆水分盈亏量空间变化趋势进行分析。正值表示该时序数据具有增加趋势,负值表示该时序数据具有减少趋势(图8)。从新疆1965—2017年各站点年均水分盈亏量变化趋势可以看出,全疆大部分地区水分盈亏量倾向率总体呈不显著增加趋势,四季减少趋势主要集中在阿勒泰地区南部、昌吉回族自治州、吐鲁番地区以及哈密地区北部等少数区域;

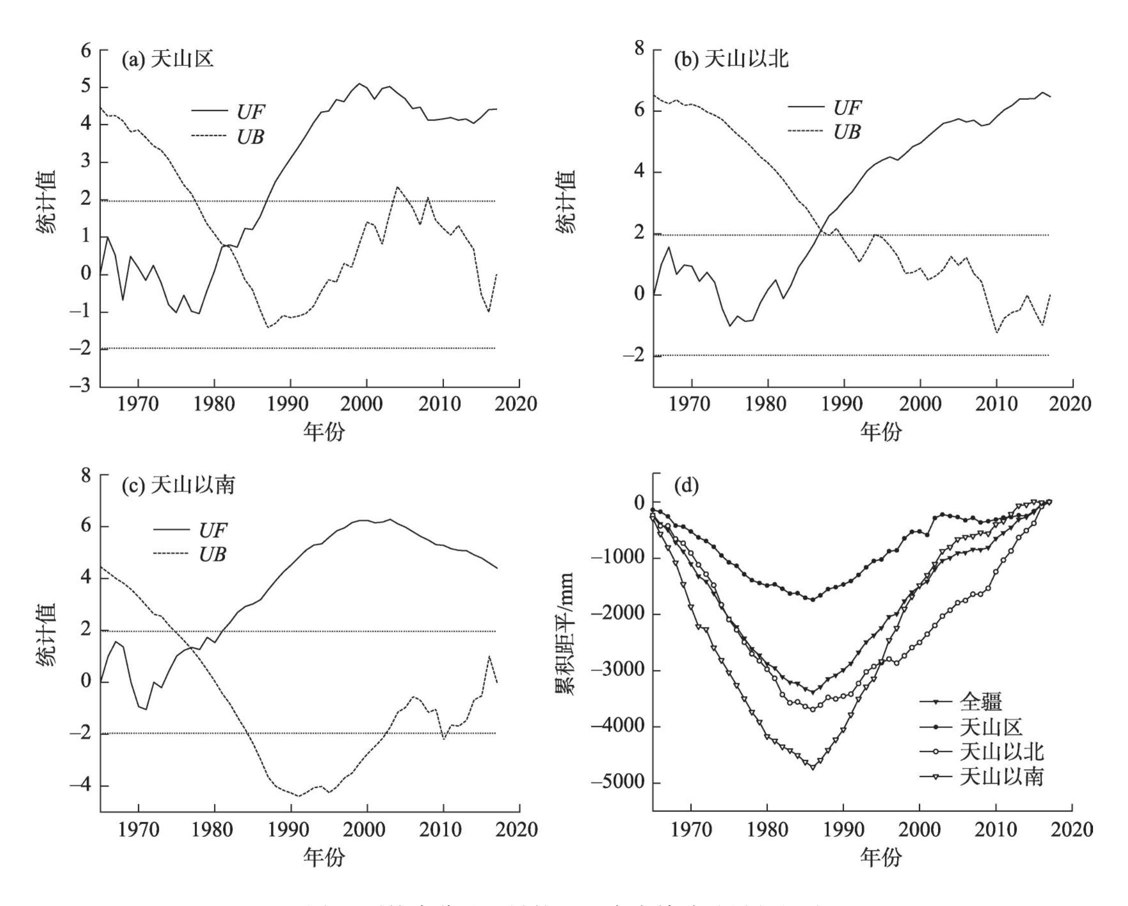


图6　平均水分盈亏量的M-K突变检验及累积距平

Fig. 6　The Mann-Kendall mutation test and the accumulation anomaly of the mean water budget

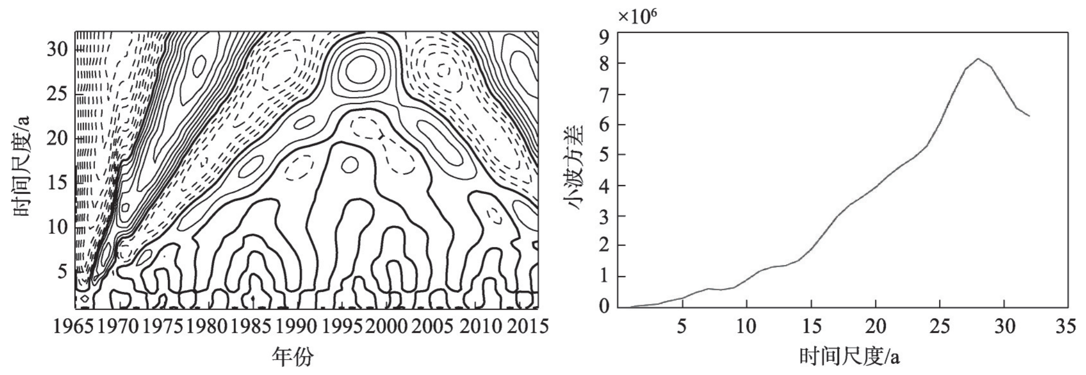


图7　新疆年平均水分盈亏量的Morlet小波系数等值线及小波方差变化曲线

Fig. 7　Morlet wavelet coefficient and Morlet wavelet variance curves of annual mean water budget in Xinjiang

75°E 80°E 85°E 90°E 95°E
45°N 40°N 35°N
水分盈亏量倾向率/[mm·(10a)⁻¹]　(a) 春季
−0.063~0.008
0.008~0.012
0.012~0.015
0.015~0.017
0.017~0.02
0.02~0.03
0 400 km

75°E 80°E 85°E 90°E 95°E
45°N 40°N 35°N
水分盈亏量倾向率/[mm·(10a)⁻¹]　(b) 夏季
−0.13~0.013
0.013~0.018
0.018~0.022
0.022~0.025
0.025~0.03
0.03~0.07
0 400 km

75°E 80°E 85°E 90°E 95°E
45°N 40°N 35°N
水分盈亏量倾向率/[mm·(10a)⁻¹]　(c) 秋季
−0.061~0.005
0.005~0.009
0.009~0.011
0.011~0.013
0.013~0.015
0.015~0.031
0 400 km

75°E 80°E 85°E 90°E 95°E
45°N 40°N 35°N
水分盈亏量倾向率/[mm·(10a)⁻¹]　(d) 冬季
−0.066~0.000
0.001~0.002
0.002~0.003
0.003~0.004
0.004~0.005
0.005~0.013
0 400 km

75°E 80°E 85°E 90°E 95°E
45°N 40°N 35°N
水分盈亏量倾向率/[mm·(10a)⁻¹]　(e) 年
−0.068~0.009
0.009~0.012
0.012~0.014
0.014~0.016
0.016~0.018
0.018~0.033
0 400 km

图8　1965—2017年新疆年和四季水分盈亏量倾向率分布

Fig. 8　Trend of annual and seasonal water budget in Xinjiang from 1965 to 2017

夏季倾向率波动最大(图8),表现为夏季西天山地区增加趋势最为明显0.07 mm·$(10a)^{-1}$,同时东天山及南北两侧地区减少趋势最明显-0.13 mm·$(10a)^{-1}$;年均水分盈亏量减少趋势出现在准噶尔盆地东部,吐鲁番地区以及塔里木盆地局部地区。

3 讨 论

1965—2017年新疆地区水分盈亏量年际变化总体呈增加趋势,而从2000年开始又呈下降趋势,这与新疆同时期潜在蒸散量变化趋势基本一致。2000—2017年全疆平均水分盈亏量减小速率为-14.27 mm·$(10a)^{-1}$,期间天山以南地区减小速率更是高达-96.19 mm·$(10a)^{-1}$,水分盈亏量由2000年以前的上升趋势变为明显的下降趋势,这与新疆降水量变化趋势并不完全一致,因此,考虑到水分盈亏量除了受降水影响外,还可能受到其他因素影响,通过进一步分析水分盈亏量与主要气象因子的相关性,发现与气温的相关性最小,而受降水和平均风速的影响最大,其中平均风速为主导因素(表2)。这与相关研究结果基本一致,如郭小娇等[34]通过研究国内外水分蒸散发进展得出全球范围内不同地区潜在蒸散发呈减少趋势,其原因主要是日照时数和风速的减小,刘宪锋等[35]研究得出影响我国西北五省潜在蒸散量变化的主导因素为风速,Li等[36]又对风速变化原因进行研究,表明高、低纬度的不对称增温是影响风速变化的主要原因,高纬度带升温幅度高于低纬度带,高、低纬度带间的气压差减少,造成近地表风速的减弱。姚俊强等[37]也从SPEI指数角度分析了新疆气候在20世纪80年代中后期呈"暖湿化"特征到21世纪初的"暖干化"趋势转型的可能机制,认为与北大西洋多年代际振荡存在明显的负相关性。由此可见,新疆水分盈亏量变化既受到大尺度大气环流变化的影响,也受到区域变暖的影响。

表2 新疆水分盈亏量与气候因子相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient between water budget and climate factors in Xinjiang

	平均气温	降水	相对湿度	平均风速	日照时数	水气压
冬季	0.019	0.591**	0.196	-0.632**	-0.409**	-0.734**
春季	0.031	0.661**	0.377**	-0.754**	-0.412**	-0.846**
夏季	0.294*	0.724**	0.573**	-0.927**	-0.54**	-0.67*
秋季	0.336*	0.485**	0.469**	-0.921**	-0.532**	-0.84**
年	0.505**	0.693**	0.461**	-0.913**	-0.711**	-0.829**
天山区	0.288*	0.753**	0.477**	-0.639**	-0.783**	-0.685**
天山以北	0.41**	0.738**	0.401**	-0.876**	-0.686**	-0.285*
天山以南	0.41**	0.551**	0.522**	-0.953**	-0.387**	-0.263

注:*代表通过了0.05的显著性检验;**代表通过了0.01的显著性检验。

4 结 论

水分盈亏量能够较好的反映区域气候干湿变化,为了充分了解新疆气候干湿分布情况,综合考虑了地形和多种气象要素的影响,对新疆1965—2017年水分盈亏量进行分区研究,分析了时空分布特征和周期变化特征,得出主要结论如下:

(1) 时间分布上,新疆水分盈亏量年际变化总体呈增加趋势,水分盈亏量增加速率从大到小依次为天山以南93.69 mm·$(10a)^{-1}$、天山以北88.78 mm·$(10a)^{-1}$、天山区34.36 mm·$(10a)^{-1}$。全疆平均增加速率为72.28 mm·$(10a)^{-1}$。水分盈亏量季节上夏季亏损最大,线性变化速率为18.82 mm·$(10a)^{-1}$,其次是春季、秋季,冬季亏损最小,线性变化速率为2.64 mm·$(10a)^{-1}$。

(2) 空间分布上,新疆水分盈亏量呈现从西到东水分亏损逐渐增大,其中水分亏损量最大值(-510 mm)出现在夏季,主要分布在吐鲁番盆地、哈密地区、巴音郭楞蒙古自治州北部,水分亏损量最小值(-16 mm)在冬季主要位于伊犁地区和阿勒泰地区。全疆水分盈亏量大部分地区处于增加趋势,减小趋势位于准噶尔盆地东部以及于田、阿拉尔、且末、轮台地区。

(3)突变特征和周期分析上,新疆平均水分盈亏量时序数据1985年发生了一次突变,在7 a、12 a、28 a处均出现波峰,其中以28 a时间周期上变化最明显,为第一主周期。

参考文献(References)

[1] 李红瑛, 薛羽, 曹二佳, 等. 近50年来乌兰察布市水分盈亏量时空变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 145-151. [Li Hongying, Xue Yu, Cao Erjia, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water deficit in Ulanqab during thelatest 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(12): 145-151.]

[2] 刘惠英, 任洪玉, 张平仓, 等. 香溪河流域近60年来降雨量变化趋势及突变分析[J].水土保持研究, 2015, 22(4): 282-286. [Liu Huiying, Ren Hongyu, Zhang Pingcang, et al. Analysis of characteristics of variation and abrup change of precipitation in Xiangxi River Watershed over the past 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(4): 282-286.]

[3] 刘友存, 侯兰功, 焦克勤, 等. 全球气候指数与天山地区气温变化遥相关分析[J]. 山地学报, 2016, 34(6): 679-689. [Liu Youcun, Hou Langong, Jiao Keqin, et al. On the teleconnection patterns to air temperature in the Tianshan Mountain, China[J]. Mountain Research, 2016, 34(6): 679-689.]

[4] 陈颖, 贾孜拉·拜山. 新疆冬季气温年际异常的主模态及其成因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 223-231. [Chen Ying, Jiazila Baishan. Annual variation of winter temperature and its causes in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 223-231.]

[5] 刘慧芝. 西北干旱区极端气候事件变化及其对北大西洋涛动指数的响应[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016. [Liu Huizhi. Changes in the Extreme Weather Events and the Responses to the North Atlantic Oscillation Index in the Arid Northwest China[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016.]

[6] 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 9-14. [Huang Jianping, Ji Mingxia, Liu Yuzhi, et al. An overview of arid and semi-arid climate change[J]. Climate Change Research, 2013, 9(1): 9-14.]

[7] Li B F, Chen Y N, Shi X, et al. Tempeature and precipitation changes in different environments in the region of Northwest China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(3-4): 598-595.

[8] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9. [Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9.]

[9] 徐荣潞, 李宝富, 廉丽姝. 1960—2015年西北干旱区相对湿度时空变化与气候要素的定量关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 233-239. [Xu Ronglu, Li Baofu, Lian Lishu. Quantitative relationship between the spatiotemporal change of relative humidity and climatic factors in the arid region of Northwest China from 1960 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 233-239.]

[10] 赵俊芳, 郭建平, 徐精文, 等. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 18-24. [Zhao Junfang, Guo Jianping, Xu Jingwen, et al. Trends of Chinese dry-wet condition based on wetness index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 18-24.]

[11] 曾丽红, 宋开山, 张柏. 1951—2008年东北地区水分盈亏量时空格局[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 858-870. [Zeng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai. Spatia land temporal structure of water deficit over Northeast China during the period of 1951-2008[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 858-870.]

[12] 颜雅琼, 申双和. 近50多年来淮河流域气候水分盈亏时空变化[J]. 气象科学, 2019, 39(4): 457-465. [Yan Yaqiong, Shen Shuanghe. Spatial and temporal changes of climatic and water deficitin the Huaihe River Basin over past 50 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(4): 457-465.]

[13] 史建国, 严昌荣, 何文清, 等. 黄河流域水分亏缺时空格局变化研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 113-119. [Shi Jianguo, Yan Changrong, He Wenqing, et al. Study on spatial and temporal variation of water surplus and deficiency in Yellow River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(1): 113-119.]

[14] 徐冬平, 卜金洋, 杨军辉. 黄河流域水分盈亏量时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4):739-746. [Xu Dongping, Bu Jinyang, Yang Junhui. Spatiotemporal change of water budget and its affecting factors in the Yellow River basin[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 739-746.]

[15] 高歌, 许崇育. 1961—2010年中国十大流域水分盈亏量时空变化特征[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 380-391. [Gao Ge, Xu Chongyu. Characteristics of water surplus and deficit change in 10 major river basins in China during 1961 to 2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 380-391.]

[16] 姚玉龙, 刘普幸, 卓玛兰草. 51a来甘肃省水分盈亏量的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(2): 202-208. [Yao Yulong, Liu Puxing, Zhuoma Lancao. Spatiotemporal change of water budget in Gansu province in recent 51 years[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(2): 202-208.]

[17] 姚晓军, 张晓, 孙美平, 等. 1960—2010年中国西北地区水分盈亏量时空特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 607-616. [Yao Xiaojun, Zhang Xiao, Sun Meiping, et al. Spatial-temporal characteristics of water deficit in Northwest China from 1960 to 2010[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 607-616.]

[18] 李佳秀, 陈亚宁, 刘志辉. 新疆不同气候区的气温和降水变化及其对地表水资源的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(3): 371-380. [Li Jiaxiu, Chen Yaning, Liu Zhihui. Variations in temperature and precipitation and their influences on surface water resource in different climate zones of Xinjiang[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(3): 371-380.]

[19] 刘伟, 姜逢清, 李小兰. 新疆气候变化的适应能力时空演化特征

[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 531−540. [Liu Wei, Jiang Fengqing, Li Xiaolan. Spatiotemporal evolution of adaptive capacity to climate change in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 531−540.]

[20] 张扬, 楚新正, 杨少敏, 等. 近56 a新疆北部地区气候变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 212−219. [Zhang Yang, Chu Xinzheng, Yang Shaomin. Climate change in North Xinjiang in recent 56 years[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 212−219.]

[21] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 等. 近60 a来新疆不同海拔气候变化的时空特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 822−829. [Zhang Yin, Tuerxunbai Gulixian, Su Litan, et al. Spatial and temporal characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 822−829.]

[22] 普宗朝, 张山清, 王胜兰, 等. 近48 a新疆干湿气候时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1563−1572. [Pu Zongchao, Zhang Shanqing, Wang Shenglan, et al. The spitial-temporal variation characteristic of dry-wet climate in recent 48 years in Xinjiang Province, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1563−1572.]

[23] 宋佳, 徐长春, 杨媛媛, 等. 基于MODIS16的新疆干湿气候时空变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 210−221. [Song Jia, Xu Changchun, Yang Yuanyuan, et al. Temporal and spitial variation characteristic of evapotransiration and dry-wet climate in Xinjiang based on MODIS16[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 210−221.]

[24] Jiapaer G L, Liang S L, Yi Q X, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015, 58(5): 64−76.

[25] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994−3008. [Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994−3008.]

[26] 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区降水时空分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5846−5855. [Yao Junqiang, Yang Qing, Liu Zhihui, et al. Spatiotemporal change of precipitation in arid region of the Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5846−5855.]

[27] 杨莲梅, 刘晶. 新疆水汽研究若干进展[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 1−13. [Yang Lianmei, Liu Jing. Some advances of water vapor research in Xinjiang[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 1−13.]

[28] 刘燕, 刘友存, 陈明, 等. 基于Penman-Monteith的江南丘陵地区地表参考蒸散量和水分盈亏量特征分析[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(4): 680−688. [Liu Yan, Liu Youcun, Chen Ming, et al. Analysis on the variation characteristics of surface water in the Jiangnan Hills based on the Penman-Monteith method[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(4): 680−688.]

[29] 陈镜明, 柳竞先, 罗翔中. 基于碳水通量耦合原理改进Penman-Monteith蒸散发模型[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 59−75. [Chen Jingming, Liu Jingxian, Luo Xiangzhong. Improving the Penman-Monteith evapotranspiration model based on the coupling principle of carbon and water fluxes[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 59−75.]

[30] Garcia M, Raes D, Allen R, et al. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125(1−2): 67−82.

[31] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61−78.

[32] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1): 254−271.

[33] 张宏芳, 巨晓璇, 卢珊, 等. 精细化网格的降水预报解析方法对比[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 7−14. [Zhang Hongfang, Ju Xiaoxuan, Lu Shan, et al. Comparison of parsing methods for fine grid precipitation forecasting[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(3): 7−14.]

[34] 郭小娇, 石建省. 水分蒸散发研究国内外进展与趋势[J]. 地质论评, 2019, 65(6): 1473−1486. [Guo Xiaojiao, Shi Jiansheng. Global review of the research progress and trend of evapotranspiration[J]. Geological Review, 2019, 65(6): 1473−1486.]

[35] 刘宪锋, 潘耀忠, 张锦水, 等. 1960—2011年西北五省潜在蒸散的时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2564−2570. [Liu Xianfeng, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui, et al. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in five provinces of Northwes China in 1966−2011[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2564−2570.]

[36] Li Y, Chen Y, Li Z, Fang G. Recent recovery of surface wind speed in Northwest China[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(12): 4445−4458.

[37] 姚俊强, 毛炜峄, 陈静, 等. 新疆气候"湿干转折"的信号和影响探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 57−72. [Yao Junqiang, Mao Weiyi, Chen Jing, et al. Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 57−72.]

Spatiotemporal variation characteristics of the water budget in Xinjiang during the latest 53 years

LU Baobao[1], SUN Huilan[1], JIANG Quanquan[2], CAO Lijun[1],
LAN Xiaoli[1], ZHANG Lele[1], LIU Tianyi[1]

(1. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;
2. State Energy Group Xinjiang Jilintai Hydropower Development Co. Ltd, Ili 835700, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data of 58 meteorological stations in Xinjiang from 1965 to 2017, the daily potential evapotranspiration was calculated using a Penman-Monteith (P-M) model, after which the water budget was calculated by combining precipitation data. Mann-Kendall (M-K) mutation test, wavelet analysis and Pearson correlation analysis were used to analyze temporal and spatial variation characteristics and factors influencing water content in Xinjiang. We found: (1) In the last 53 years, the interannual variation in the water budget in Xinjiang showed an overall increasing trend. The maximum increasing tendency rate of water budget was 93.69 mm·$(10a)^{-1}$ in the south of the Tianshan Mountains, followed by a minimum 34.36 mm·$(10a)^{-1}$ in the north of the Tianshan Mountains, where the average increasing tendency rate was 72.28 mm·$(10a)^{-1}$ in the whole Xinjiang. Seasonal variation in the water budget was as follows: summer > spring > autumn > winter. The linear variation rate in summer was a maximum 18.82 mm·$(10a)^{-1}$ and minimum 2.64 mm·$(10a)^{-1}$ in winter. (2) Spatially, the maximum moisture loss for each season mainly occured in the surrounding areas of the Turpan Basin, Hami region and the northern area of Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture. The minimum value is mainly located in the Yili River Valley and Aletai area. Annua water surplus and deficist are increasing in most areas and decreasing in the north of Tianshan Mountains and some areas of the Tarim Basin. (3) There was a sudden change in the time series data for mean water surplus and deficit in Xinjiang around 1985 year. Since 2000, except for the area north of the Tianshan Mountains, the water surplus and deficit in other areas showed a clear decreasing trend, with a time period of 28 years as the first main period.

Keywords: Xinjiang; water budget; Penman-Monteith model; climate change; spatio-time characteristics